6П

УДК 004.382

С.А. Поливцев
Институт проблем искусственного интеллекта МОН Украины и НАН Украины,
г. Донецк, Украина
info@iai.donetsk.ua

Интеллектуальная радиосеть с нечеткой конфигурацией

В статье обсуждаются возможности применения одноранговой радиосети стандарта IEEE 802.15.4 (ZigBee) диапазона 2,4 ГГц для работы системы, состоящей из группы малогабаритных мобильных роботов и одного командного пункта. Основная задача группы роботов – проведение разведки во время спасательных операций после техногенных и природных катастроф и аварий. Для сохранения управляемости отдельными роботами и системой в целом предлагается повысить «интеллект» системы связи за счет гибкой маршрутизации каналов между командным пунктом и конкретным мобильным роботом с тем, чтобы иметь систему с автоматическим, интеллектуальным восстановлением канала обмена данных.

Введение

Пусть имеется группа малогабаритных роботов, каждый робот группы оснащен набором сенсоров для обнаружения живых людей и других объектов. Каждый робот имеет собственную систему управления движением и систему радиосвязи с командным пунктом. Более подробно конструкция робота описана в [1].

В процессе работы роботы передают на командный пункт различные данные: собственное положение в пространстве, результаты обнаружения объектов, собственные ресурсы, а также получают задания с командного пункта. Можно говорить, что по каналам радиосвязи передается обычная телеметрическая информация. Подвижность роботов относительно друг друга и общего командного пункта обуславливает возможную потерю связи между отдельным роботом и командным пунктом. Возникает следующая задача: для сохранения управляемости отдельными роботами и системой в целом необходимо повысить «интеллект» системы связи до такой степени, чтобы нарушение ранее установленного канала обмена данными не приводило к потере управляемости системой в целом. В принципе эта задача не новая, но ранее ее решение лежало целиком на человеке – операторе (операторах), а в системе с группой роботов требуется автоматизировать ее решение. Причин для автоматизации несколько – связь осуществляется очень быстро (десятки миллисекунд), данные передаются короткими порциями (единицы миллисекунд), роботы постоянно меняют свое положение в пространстве. То есть человек просто не в состоянии отследить текущую обстановку и принять решение за приемлемое время. Если замедлить время обмена информацией или скорости движения роботов, то эффективность робототехнической системы значительно упадет.

В настоящее время во всем мире очень перспективным считается стандарт передачи информации по радиоканалу стандарта ZigBee/802.15.4 на частоте 2,4 ГГц. Это стандарт беспроводной сети, предназначенный для организации сетей передачи информации от большого количества радиодатчиков, а также для простого беспроводного соединения двух устройств. Скорость связи в этом стандарте не самая большая по сравнению с другими стандартами (802.11b/g или Bluetooth), работающими в том же

диапазоне частот 2,4 ГГц, высокая скорость при обработке телеметрической информации не требуется.

Краткие характеристики стандарта ZigBee:

– Частотный диапазон – 2.4 ГГц (2400 – 2483 МГц), обычно 16 каналов частот с шириной 5 МГц.

– DSSS – прямое расширение спектра сигнала.

– O-QPSK – квадратичная фазовая манипуляция со смещением.

– Максимальная разрешенная мощность передатчика – 100 мВт.

– Оценка уровня мощности сигнала в эфире – RSSI и подтверждение о доставке для каждого пакета данных.

– Mesh-сетевая технология, обеспечивающая самоорганизацию и самовосстановление радиосети.

– Механизм множественного доступа в эфир с контролем несущей и предотвращением коллизий – CSMA (Carrier Sense, Multiple Access), то есть устройство сначала проверяет, не занят ли эфир, и только после этого начинает передачу.

– 128-битное шифрование данных протокол AES 128 (ATEE и ATKY) – кодирование и ограничение доступа .

– До 65 536 узлов (модемов) в сети.

– Скорость передачи данных вместе со служебной информацией – до 250 Кбит/с.

Дальность связи для стандарта ZigBee составляет около 20 – 30 м в пределах здания при мощности передатчика 1 мВт. Соответственно для получения выходной мощности 1 мВт необходимо питать микросхему трансивера напряжением около 2 В при токе потребления до 22 мА. При увеличении мощности передатчика до нескольких десятков мВт можно получить дальность до сотни метров в здании и более километра на открытом пространстве.

Частотный диапазон 2,4 ГГц обычно разделяют на 16 – 84 каналов. Каждое устройство имеет сетевой адрес. Достаточно высокая скорость передачи позволяет выходить в эфир и передавать информацию между устройствами за очень короткое время, не занимая частотный канал на длительный период. Поэтому количество приемопередатчиков, работающих в одном физическом пространстве, практически не ограничено. В отличие от простого передатчика на одном конце и приемника на другом (в варианте 433 МГц), все модули на 2,4 ГГц имеют трансивер (приёмопередатчик), что улучшает надежность доставки информации путем повторной передачи при отсутствии подтверждения о получении.

Существует достаточно много трудов и статей по вопросу выбора диапазона и протокола обмена. Наиболее полно и кратко этот вопрос освещен в [2].

Выбор диапазона 2,4 ГГц обусловлен многими факторами, в том числе такими, как: отсутствие необходимости брать разрешение на использование этого радиодиапазона во всем мире; наличие широкой номенклатуры микросхем, физически реализующих радиосвязь; наличие открытых библиотек программ, реализующих различные протоколы связи. Но каждая фирма – производитель микросхем стандарта ZigBee – привязывает программное обеспечение к архитектуре своих микросхем, что сильно затрудняет принятие конкретных программных и электронных решений для конечных разработчиков. Основная трудность состоит в том, что для работы с конкретным набором микросхем и программ необходимо приобрести несколько готовых модулей (КИТ), потратить значительное время на освоение работы с модулем и только после таких работ с несколькими модулями можно принять наиболее приемлемое решение для конкретной разработки. Далее рассматривается несколько из предлагаемых наборов решений, анализируются возможности применения их для группы роботов и предлагается наиболее оптимальное (для данного приложения) решение по построению системы с автоматическим, интеллектуальным восстановлением канала передачи данных.

Анализ предлагаемых систем и протоколов стандарта ZigBee

С самого начала анализа предлагаемых систем связи стандарта ZigBee следует подчеркнуть, что абсолютно все предлагаемые системы предназначены для работы на стационарных, неподвижных объектах. Допускается иметь только отдельные, строго определенные узлы в виде брелков или RFID меток. Необходимость в применении различных видов сетей и протоколов обусловлено факторами помех в данном диапазоне связи, выходом из строя отдельных устройств. Происхождение помех более-менее подробно рассмотрено в [2]. Вкратце помехи обусловлены либо насыщенностью окружающего пространства устройствами, работающими в этом же диапазоне, либо работой различного оборудования, либо собственно средой.

Порцию данных, передаваемых за один момент времени в одном направлении, принято называть пакетом данных. В стандарте ZigBee пакет данных состоит из преамбулы, слова синхронизации, байта размера, байта флагов, поля данных и кода циклического контроля. Байт размера пакета (LENGTH), байт флагов (FLAGS) и 10..30-байтовая полезная нагрузка (PAYLOAD) вставляются приложением. Преамбула (Preamble), слово синхронизации (SOF) и кода циклического контроля (CRC) генерируются и вставляются в пакет микросхемой трансивера. Структура пакета данных показана на рис. 1. Допускается передавать блоки данных длиной до 256 байт, но при этом блок данных разбивается на пакеты по 10..32 байта. Длина преамбулы составляет 31 байт, длина слова синхронизации – 2 байта, длина CRC – 1 байт. Таким образом, общая длина пакета составляет 66 байт при использовании микросхем трансивера типа CC2400 производства фирм Chipcon [3] или Texas Instruments [4]. Для других типов микросхем длина пакета может быть другой за счет размера PAYLOAD.

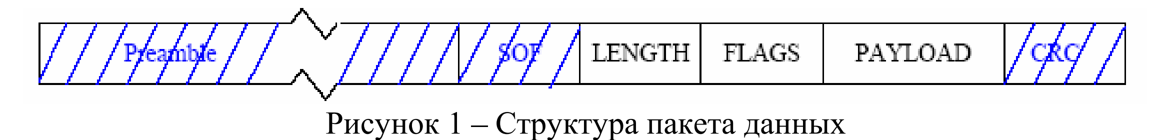


Рисунок 1 – Структура пакета данных

Фирма Texas Instruments предлагает открытую библиотеку для своего микроконтроллера типа msP430. В этой библиотеке предполагается использовать одноранговую систему связи под зарегистрированным названием SimpliciTI [5]. Графически связи в этой сети можно изобразить как на рис. 2.

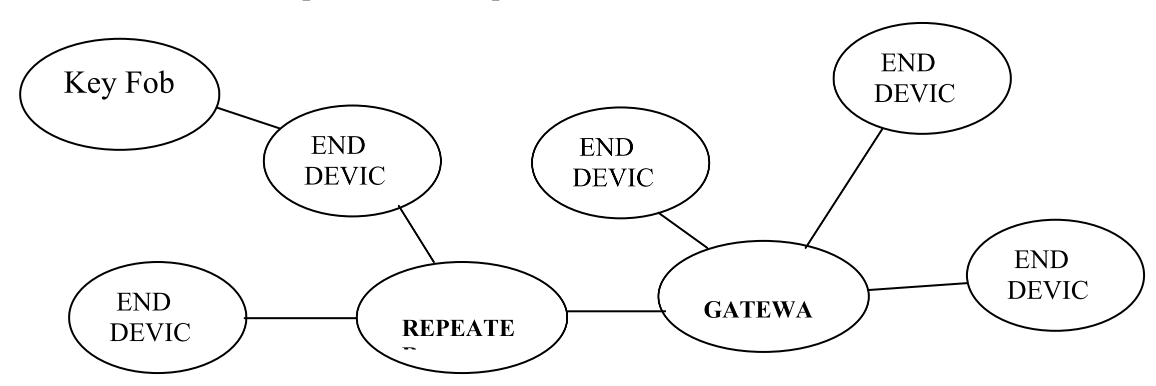


Рисунок 2 – Связи в сети SimpliciTI

На рис. 2 используются следующие обозначения: Gateway – шлюз; Key Fob – ключевой брелок; End Device – оконечное устройство; Repeater – повторитель.

Достоинствам и проблемам, связанным с протоколом SimpliciTI, посвящен журнал фирмы «КОМПЭЛ» – [6]. Из опыта автора данной статьи и статей из [6] можно выделить следующие свойства протокола SimpliciTI, ограничивающие его применение в задаче управления группой роботов.

1. Протокол SimpliciTI ориентирован только на одноранговые сети, содержащие до 30 устройств, и реализуется программно при построении сети.

2. SimpliciTI поддерживает топологии только типа «звезда» с точкой доступа для записи (GATEWAY) и отправки сообщений конечному устройству (ED), а также до четырех расширителей дальности (Repeater).

3. Точка доступа (GATEWAY) всегда включена и управляет сетью, один раз в секунду принимая информацию от одного или нескольких конечных устройств (ED).

4. Выбор канала обмена данными целиком лежит на пользователе, задается при программировании и не может быть изменен в процессе эксплуатации системы.

5. SimpliciTI не предусматривает автоматического восстановления связи при ее потере.

Еще один доступный вариант сети предлагается фирмой SYNAPSE [7]. Под торговой маркой SNAP предлагаются готовые конечные устройства, программы и библиотека процедур управления сетью. Топология сети SNAP имеет вид, как на рис. 3. (Рисунок взят из [8]). В принципе это тоже одноранговая сеть, единственное ее достоинство состоит в том, что все конечные точки (SNAP NODE) равноправны и связаны между собой, что позволяет гибко и автоматически изменять маршрутизацию пакетов в сети.

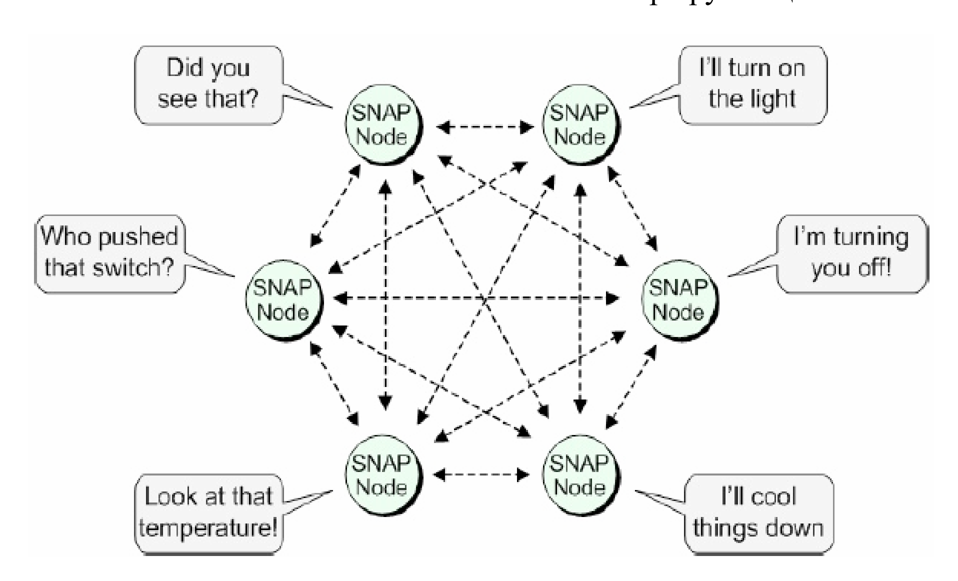
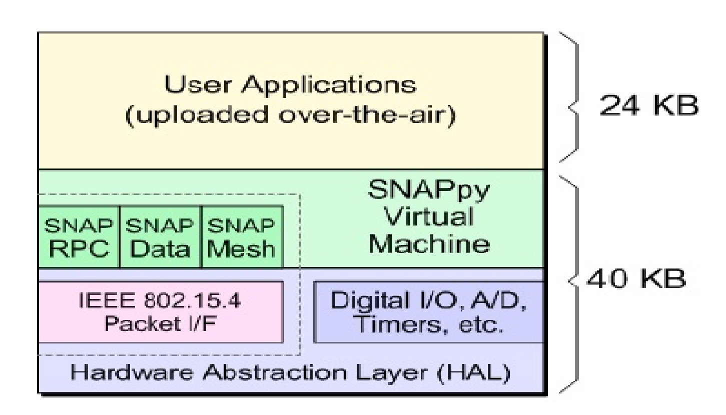


Рисунок 3 – Топология сети SNAP

Сеть SNAP имеет жесткую привязку ко времени, т.е. в какое-то определенное время вся сеть «засыпает», затем вся сеть «просыпается», в ней ведется обмен информацией и опять вся сеть «засыпает». Таким образом, управляющие контроллеры сети должны иметь очень хорошие часы реального времени (RTC) и сбой часов одной конечной точки приведет к «невидимости» ее в сети. Средств автоматического восстановления конечной точки в сети нет, есть средства автоматизации изменения маршрутов пакетов. Пользователь должен на этапе проектирования определить диапазон работы, адреса устройств в сети. Эта работа выполняется посредством языка программирования Python.

Следует заметить, что каждый узел сети SNAP – это законченное устройство, включающее как трансивер на 2,4 ГГц, так и микроконтроллер управления. В документации сети SNAP предлагается воспринимать каждый узел как высокоуровневый программный стек вида:



Рисунко 4 – Программный стек SNAP

На рис. 4 используются следующие обозначения: HAL – абстрактный физический уровень; Digital I/O – цифровой ввод-вывод; Packet I/F – управление трансмиттером; SNAPpy – интерпретатор языка Python; User Application – приложение пользователя, написанное на языке Python и загружаемое через эфир (т.е. через трансмиттер). Внимательный анализ сети SNAP показывает, что к недостаткам протокола SimpliciTI добавляются проблемы, связанные с языком Python. Эти проблемы состоят в том, что для того, чтобы программировать, язык надо хорошо знать, как и любой другой язык, Python содержит ошибки, которые надо уметь локализовать. Кроме того, поскольку Python – это интерпретатор, то в нем невозможно реализовать быстродействующие программы.

Предложения других фирм альянса ZigBee еще менее привлекательны как из-за цены (стартовый пакет стоит порядка $1000 США), так и из-за проблем с программированием устройств.

В силу вышеизложенного, в плане оборудования предлагается остановиться на наборах микросхем трансивера типа CC24xx производства фирм Chipcon (как наиболее управляемых со стороны разработчика сети), наборах микроконтроллеров фирмы SYLABS типа C8051F3xxx, как достаточно быстродействующих и обладающих достаточными ресурсами и высокой надежностью. Структуру пакета данных предлагается остановить в стандартном виде, принятом в ZigBee (рис. 1), с тем, чтобы иметь совместимость с устройствами других производителей. В плане маршрутизации пакетов предлагается за основу взять протокол SimpliciTI и доработать его под требования сети для мобильных роботов. Далее предлагаемая сеть будет именоваться как «сеть с нечеткой конфигурацией».

Сеть с нечеткой конфигурацией

Для конкретизации задачи рассмотрим систему, содержащую один командный пункт, выполняющий функции «шлюза» (Gateway), и пять мобильных роботов, каждый из которых может выполнять функции «конечной точки» (Node) и функцию повторителя (Repeater). Совокупность этих устройств образует одноранговую сеть. Далее определим требования к каждому элементу сети.

Формат пакета данных несколько модифицирован. Пользовательская часть по-прежнему содержит байт размера пакета (LENGTH), байт флагов (FLAGS), но поле полез-

ной нагрузки (PAYLOAD) содержит два байта адреса устройства источника пакета, два байта адреса устройства повторителя, два байта устройства адреса получателя. Если связь осуществляется без повторителя, то два байта адреса устройства повторителя равны нулю.

Протокол обмена пакетами данных имеет определенную иерархию. Основным источником запросов и сообщений является шлюз. Шлюз имеет адреса всего набора своих конечных точек. Каждая конечная точка имеет адрес шлюза.

Имеется несколько режимов связи. Режим проверки системы, передачи команд от шлюза к конечным точкам и прием данных шлюзом от конечных точек. Шлюз в заданном порядке перебирает все свои конечные точки, переводит свой трансивер в режим передачи, посылает команды (возможно пустые). По завершению передачи пакета шлюз переводит свой трансивер в режим приема и ожидает ответа от заданной конечной точки. Конечная точка включает свой трансивер в режиме приема в заданное время, ожидает получения команды от шлюза, переводит свой трансивер в режим передачи и посылает к шлюзу пакет данных (возможно пустой). Графически этот режим можно отобразить как показано на рис. 5.

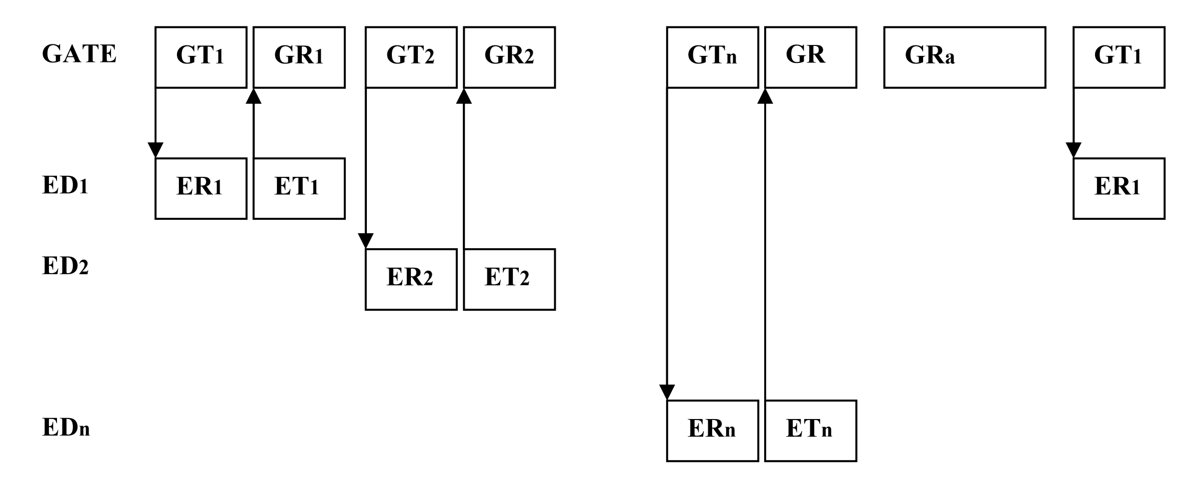


Рисунок 5 – Режим нормальной работы системы связи

На рис. 5 использованы следующие условные обозначения:
GT1..GTn – фазы передачи шлюза данных к конечным точкам ED1..EDn;
GR1..GRn, GRa – фазы приема шлюзом данных от конечных точек ED1..EDn;
ER1..ERn – фазы приема данных конечными точками ED1..EDn от шлюза;
ET1..ETn – фазы передачи данных конечными точками ED1..EDn к шлюзу;
стрелками показаны направления передачи пакетов данных.

По завершению сеанса обмена данными со всеми конечными точками шлюз переходит в фазу сканирования эфира – GRa. В этот период любое из конечных устройств может передать шлюзу экстренное сообщение. Если экстренного сообщения нет, то по завершению фазы GRa опять следует фаза GT1. Это расписание (или фазовая диаграмма) нормального режима работы «известно» всем устройствам системы и поддерживается оно наличием часов реального времени (RTC) в каждом из устройств системы. Точность хода RTC составляет ±0,5 мС. В системе существует команда коррекции времени конечных точек относительно RTC шлюза.

Если какая-то из конечных точек (x) не ответила на фазе обмена данными и не передала сообщение на фазе экстренного обмена GRa, то шлюз начинает поиск повторителя для этой EDx. Фазовая диаграмма режима поиска повторителя отображена на рис. 6.

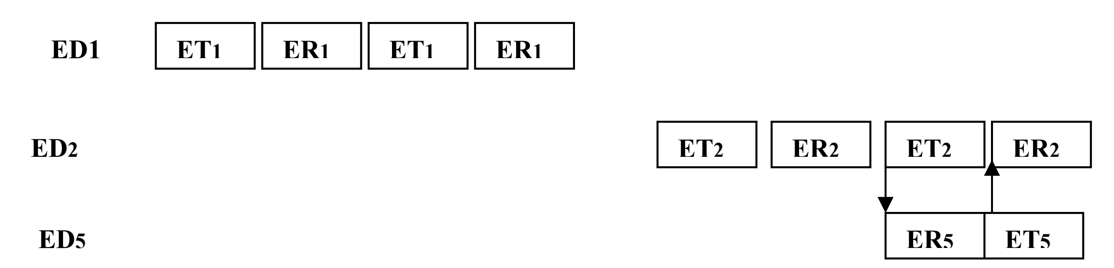


Рисунок 6 – Режим поиска повторителя

Режим состоит в том, что шлюз в определенном порядке перебирает все доступные ему ED, переводит каждую выбранную точку в режим поиска на определенное время. За это время выбранная ED выполняет определенное число передач и приема данных к/от потерянной ED. Если текущая (например, ED1 на рис. 6) не «нашла» потерянную ED5, то в режим поиска подключается ED2. Пусть ED2 находит потерянную ED5 и сообщает об этом событии шлюзу. Тогда шлюз назначает ED2 повторителем для ED5 и система возвращается в нормальный режим работы. Но обмен данными шлюз – ED5 идет через ED2 (рис. 7).

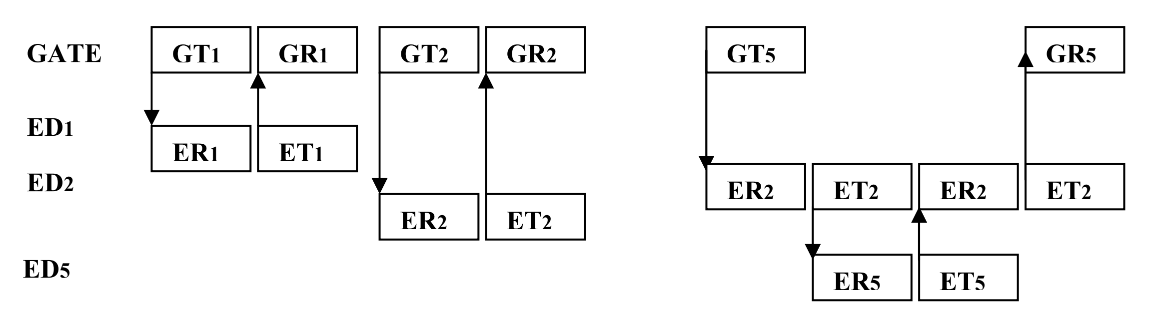


Рисунок 7 – Режим нормальной работы системы с повторителем

Разумеется, при этом расписание сеансов связи изменится (за счет времени передачи пакетов через повторитель) и это новое расписание шлюз обязан вычислить и передать в виде команд всем конечным точкам.

Логика работы предлагаемой сети требует, чтобы все устройства сети «знали» адреса всех членов сети. Эта работа выполняется в полуавтоматическом режиме при инициализации сети. В начальном состоянии все устройства сети имеют отключенные источники питания. Первым оператор включает питание командного пункта (шлюза), который начинает беспрерывные циклы передачи и приема на одной из свободных частот. Затем включается питание одного из ED, которое начинает свою работу с поиска шлюза во всем диапазоне частот. Обнаружив шлюз, ED посылает ему соответствующий пакет данных, шлюз регистрирует данное устройство и продолжает цикл поиска устройств. Этот цикл можно ограничить по времени или прекратить по команде оператора. После этого шлюз формирует расписание связи, сообщает всем ED состав сети на данный момент, задает всем ED время RTC, производит другие настройки и запускает сеть в работу. Если не задано движение роботов, то шлюз может задать время засыпания/просыпания устройств для экономии питания устройств.

В этой же маненре производится реконфигурация сети в процессе работы. Данная сеть обладает следующими достоинствами: никаких работ по программированию сети проводить не требуется; конфигурация и реконфигурация сети производится автоматически, без участия оператора; сеть автоматически устанавливает свои режимы работы – эти свойства определяют «интеллектуальность» сети. Возможность добавления новых членов и перехода членов сети из состояния «конечная точка» в «повторитель» определяет статус сети как с «нечеткой конфигурацией».

Выводы

Незначительные изменения в пакете данных и добавление новых протоколов связи позволяют построить в стандарте ZigBee интеллектуальную радиосеть с нечеткой конфигурацией. Свойства сети позволяют применять ее как перемещающихся устройств (группы мобильных роботов), так и стационарных устройств. Настройка сети, ее конфигурирование и реконфигурирование в процессе работы производится без вмешательства человека – оператора и принципиально не требуют разработки или модификации программ в устройствах сети.

Литература

1. Поливцев С.А. Малогабаритный шагающий робот высокой проходимости / С.А. Поливцев // Искусственный интеллект. – 2004. – № 2. – С. 217-223.
2. Незнамов Ю.А. Перспективы использования беспроводных ZigBee-интерфейсов в электроприводе / Ю.А. Незнамов, В.М. Козаченко. – Электронные компоненты. – 2008. – № 11. – С. 17-24.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.chipcon.com/.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ti.com/home_p_rf_if.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ti.com/ SWRA144. SimpliciTI Developer’s Notes Measuring Power Consumption With CC2430 and Z-Stack.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:/www.compeljournal.ru/Новости электроники, № 2. – 2010.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.synapse-wireless.com
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http:// www.synapse-wireless.com/SNAP_WP_102108.pdf

С.О. Полівцев
Інтелектуальна радіомережа з нечіткою конфігурацією
У статті обговорюються можливості застосування однорангової радіомережі стандарту IEE 802.15.4 (ZigBee) діапазону 2,4 Ггу для роботи системи, що складається з групи малогабаритних мобільних роботів та одного командного пункту. Основна задача групи роботів – проведення розвідки під час рятувальних операцій після техногенних та природних катастроф і аварій. Для збереження керованості окремими ротами та системою в цілому пропонується підвищити інтелект системи зв’язку за рахунок гнучкої маршрутитизації каналів між командним пунктом та конкретним мобільним роботом з тим, щоб мати систему з автоматичним, інтелектуальним відновлюванням каналу обміну даних.

S.A. Polivtsev
Intellectual Radio Networks with Fuzzy Configuration
In the article the possibilities of application peer-to-peer radio networks of standard IEEE 802.15.4 (ZigBee) a range of 2,4 GHz for work of the system consisting of small-sized mobile robots group and one command point are discussed. The primary goal of group of robots – is carrying out of investigation during rescue operations after technogenic and natural accidents and failures. For controllability preservation by separate robots and system as a whole, it is offered to raise “intelligence” of a communication system at the expense of flexible routeing of channels between command point and the concrete mobile robot to have system with automatic, intellectual restoration of the channel of data exchange.

Статья поступила в редакцию 14.06.2010.